

PID-SZABÁLYOZÓVAL ELLÁTOTT ROBOTHAJTÁS SZIMULÁCIÓJA BOND-GRÁF-MODELL ALAPJÁN

THE SIMULATION OF A PID CONTROLLED ROBOTIC DRIVE BASED ON BOND GRAPH MODELLING

Korsoveczki Gyula,¹ Pál Patrik,² Husi Géza³

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Mechatronikai Tanszék. Debrecen, Magyarország.

¹ korsoveczki.gyula@gmail.com

² palpatrik5@gmail.com

³ husigeza@eng.unideb.hu

Abstract

During the study, the simulation of a robotic drive was realised using the 20-sim simulation software. The assumed robotic drive consists of an ideal permanent magnetic DC motor, a gear pair to realise the speed reduction, a torque transfer torsion shaft and a differential gear pair to change the direction and inertia. The drive is controlled by a speed control loop using a PID controller. In line with the purpose and result of the study, the simulation proved the effectiveness of Bond Graph-based modelling.

Keywords: *mechatronics, robotic drive, Bond Graph, block diagram, PID, 20-sim.*

Összefoglalás

A tanulmány során egy robotothajtáslánc szimulációja valósult meg a 20-sim szimulációs szoftver alkalmazásával. Az említett hajtáslánc egy ideális állandó mágneses egyenáramú motorból, egy sebességsökkentő fogaskerékpárból, egy nyomatékvitelt megvalósító torziós tengelyből és egy differenciál-fogaskerék párból áll, amely a mozgás hatásláncának irányát változtatja. A hajtáslánc rendelkezik egy PID-szabályozóval ellátott fordulatszám-szabályozó hurokkal. A tanulmány eredményeként és céljaként alkalmazásra és bizonyításra került a Bond-gráf-alapú modellezés hatékonysága.

Kulcsszavak: *mechatronika, robotikai hajtáslánc, Bond-gráf, blokkdiagram, PID, 20-sim.*

1. Bevezetés

A mai mérnöki tudományok egyre összetettebb szintre jutnak el. Ahogy a rendelkezésre álló technológia fejlődik, úgy nő a mérnöki rendszerek komplexitása is. Célzott folyamatról beszélünk, hiszen ennek eredményeként gyakorta a rendszerek több és több feladatot képesek ellátni. Ezzel együtt jár azonban, hogy a rendszerek megvalósítása részletesebb tervezési vagy modellezési folyamatot igényel. Olyan modellezési nyelvet szükséges találni, amely nem erőforrás-igényes, és a modell válasza a valós fizikai rendszer válaszával megegyező.

2. A Bond-gráf-alapú modellezés

2.1. A Multi-Domain-rendszerek modellezése

Minden rendszer rendelkezik a saját leírónyelvezetével. Azokat a rendszereket, amelyek csak egy fizikai tartományban működnek, Single Domain-rendszereknek nevezzük. A modern tervezés azonban az összetett rendszerekre összpontosít. Az alrendszerek között fizikai vagy információs kapcsolat van, és a változók hatása átadódik. Ezeket a rendszereket Multi-Domain-rendszereknek nevezzük. A mechatronikai rendszerek jellemzően Multi-Domain rendszerek [1]. Ezek esetében

a legnagyobb kihívást a működésük modellezése jelenti. A dinamikus modell létrehozásához kapcsolatok létrehozás szükséges. Ez azonban nehéz eltérő leírónyelvezetek esetén. A kulcs egy olyan fizikai változó, amely minden rendszerben jelen van. Ez a fizikai változó az energia [1].

2.2. A Bond-gráf-modellezés alapjai

A Bond-gráf egy speciális vizuális és matematikai leírónyelvezet, amely energiaalapú. Hatékony modellezési módszer Multi-Domain-rendszerek-nél, mivel az energia olyan fizikai változó, amely minden Single Domain-rendszerben jelen van. A módszert Henry Paynter dolgozta ki 1959-ben, mely szerint a kétirányú energiaáramlás a jelölés-rendszer különböző elemein keresztül követhető nyomon. Ennek eredményeként lehetőség nyílik rendszeregyenletek, valamint a köztük lévő kapcsolatok definiálására [1, 2].

2.3. A Bond-gráf leíró nyelvezete

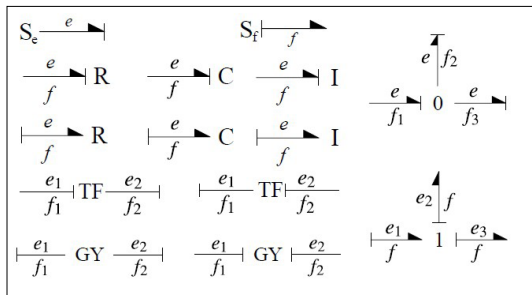
A Bond-gráf alapja 2 teljesítményváltozó. Ezek szorzata adja az átadott teljesítményt, amely [1–3]:

$$P(t) = e(t) \cdot f(t) \quad (1)$$

Ezek szerepe meghatározott, és nem felcserélhető. A nyelv a Bondokon alapul, amelyek az elemek közötti fizikai vagy információs kapcsolatot reprezentálják. Az elemek lehetnek: [3–5]:

- passzív egykapus elemek (R , C , I)
- aktív egykapus elemek (Se , Sf)
- két-/háromkapus csomópontok (TF , GY , 0 , 1)

A passzív elemek energia tárolására vagy disszipálására szolgálnak. Új energiát nem állítanak elő, csak a meglévőt használják fel. Lehetnek R elemek (pl. csillapítás, csapágyazás, elektromos ellenállás), C elemek (pl.: rugó, a tengely, a kondenzátor) és az I elemek (pl.: tömeg, a tehetetlenség, az áramköri tekercs). Az egykapus aktív elemek új teljesítményváltozót adhatnak a rendszerhez. Ez effort (Source of effort), vagy flow (Source of flow). Az alapvető kétkapus csomópontok közül a transzformátor (TF) az energiát egyik formából a másikba alakítja át, miközben szigorúan megtartja a teljesítményváltozók szerepét a girátorral (GY) szemben. A csomópontok másik nagy csoportja a három-/többkapus csomópontok, melyek közül a 0-s csomópontban az effort értéke állandó, míg az 1-es csomópontban a flow értéke konstans. Mindkét esetben a másik teljesítményváltozó előjeles összege zérus. A Bond-gráf-alapú rendszermodellezés legfontosabb aspektusa a kauzalitás vagyis ok-okozati összefüggés.



1. ábra. Az alapvető Bond-gráf-elemek [4]

A kauzalitás megmutatja az effort és flow áramlási irányát a Bondok mentén, meghatározásukhoz pedig a vonatkozó szabályok ismerete szükséges [6–8]. Az alapvető Bond-gráf-elemeket az 1. ábra szemlélteti.

3. Ipari robotok hajtáslánca

Az ipari robotok mozgó mechanizmusok, amelyek csuklókból és szegmensekből állnak, valamint legalább 3 szabadságfokkal rendelkeznek. Mozgásuk precíz kényszermozgás, ismétlési pontosságuk századmilliméteres. A szegmenseket a hajtólánc mozgatja, a következő egységekkel [9]:

- tápegység
- meghajtóegység
- mozgásátalakító egység
- irányítóegység.

Az ipari robotok rendelkezhetnek pneumatikus, hidraulikus vagy elektromos hajtáslánccal. A pneumatikus hajtások sűrített levegőt használnak. Tiszta, robbanásbiztos, és kedvező teljesítmény/tömeg arányú, és kis beépítési hellyel rendelkezik, viszont rossz a jelátviteli képessége, és magas a zajszintje. A hidraulikus hajtások speciális folyadékot használnak nagyobb erőkkel. Előnye a kedvező teljesítmény/tömeg arány és az olaj jó jelátvivő képessége. Hátránya a robbanás- és tűzveszély, a zajproblémák, az olajszennyezés és az erős hőmérsékletfüggés. A leggyakrabban használt megoldások az elektromos hajtások. Fontos az alacsony motortömeg, mivel a kinematikai lánc részét képezik. Fontos még a nagy nyomaték, mivel az ipari robotokat ugyanazzal a dinamikával kell mozgatni a teljes terhelési tartományban. A motornak széles fordulatszám-tartományt kell produkálnia. A kimeneten jellemzően nincs állítható áttétel, így a fordulatszám változtatása széles mozgástartományt biztosít. Léptetőmotorok, DC- vagy AC-szervomotorok használata. A cél a kis sebességű robotkarok mozgatása kis tömegű, de nagy sebességű, nagy nyomatékú

motorokkal. A hajtások feladata a fordulatszám és nyomaték illesztése és a mozgásformák átalakítása. Fogaskerekek, bolygóművek és hullámhajtóművek használatosak. Utóbbival akár (1/200) sebességátvitel is elérhető [9–11].

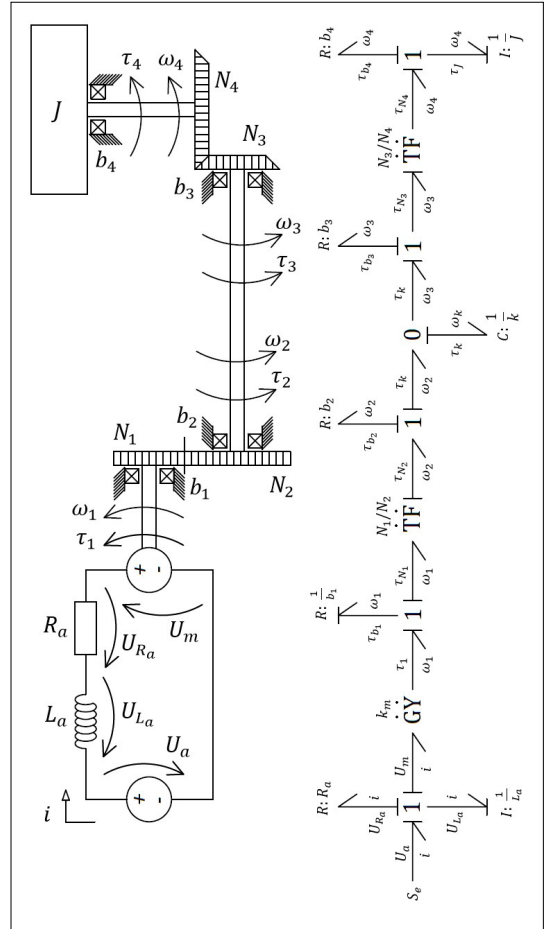
4. A hajtáslánc modellezése

4.1. A hajtáslánc felépítése

A hajtáslánc alapvető eleme a PMDC-motor. A motor R_a armatúra ellenállással, L_a armatúra induktivitással, U_a bemeneti feszültséggel U_m elektromotoros feszültséggel és i armatúra árammal rendelkezik. A motor τ_1 nyomatékot és ω_1 szögsebességet állít elő. Kimenő tengelye b_1 csillapítási állandójú csapágyakkal rendelkezik. Mivel a motor alapvetően széles fordulatszám-tartományban képes mozogni, de az axisok stabil, nagy nyomatékot és alacsony fordulatszámot igényelnek, a kívánt fordulatszám az N_1/N_2 fogaskerékpárral valósul meg. A nyomatékátvitelt a k torziós tengely végzi. A motor axiális iránya merőleges a mozgás hatástengelyére, így egy N_3/N_4 differenciál-fogaskerékpár került alkalmazásra. A differenciálmű-pár 90°-os mozgásátalakítást tesz lehetővé. A csapágyak b_3 és b_4 csillapítási állandóval rendelkeznek. Az axist a J tehetetlenségi nyomaték reprezentálja.

4.2. A hajtáslánc Bond-gráf-alapú modellje

Fontos az elemek és a változók helyes megválasztása. A motor sorosan kapcsolt áramkörre 1-es csomóponttal modellezhető. A feszültségforrás Se elemmel, az armatúra ellenállása R elemként, induktivitása pedig I elemként modellezhető. A motor maga egy k_m motor, konstans arányú girátor (GY). A motor kimenete szintén 1-es csomópont, mely egy R csapágyelemet tartalmaz. A sebességcsökkentő fogaskerékpár transzformátor (TF) N_1/N_2 áttétellel. Az N_2 tengely kimenő csapágyát b_2 értékű R tagként írhatjuk le. A k torziós tengely C tagként modellezhető. Ez a csatlakozás felelős a nyomatékátvitelért, így 0-s csomóponttal reprezentálható. A kimeneti csapágy egy b_3 állandójú R tag, míg a differenciál-fogaskerékpár TF elem N_3/N_4 arányszámmal. Végül a kimeneti oldalt 1 csomóponttal került modellezésre, ahol a csapágy b_4 értékű R tag, a tengely pedig J jellemző értékű I tag. A hajtáslánc felépítése és annak Bond-gráf-alapú modellje a 2. ábrán látható.



2. ábra. A hajtáslánc és a Bond-gráf modellje

4.3. A rendszeregyenletek

A Bond-gráf-alapú modellezés előnye az egyenletek közvetlen meghatározásának lehetősége. Az egyenáramú motorra vonatkozó egyenletek az alábbiak:

$$U_{L_a} = U_a - U_{R_a} - U_m \quad (2)$$

$$L_a \cdot \frac{di}{dt} = U_a - R_a \cdot i - k_m \cdot \omega_1 \quad (3)$$

$$\tau_{b_1} = \tau_1 - \tau_{N_1} \quad (4)$$

$$b_1 \cdot \omega_1 = k_m \cdot i - \frac{N_1}{N_2} \cdot \left(b_2 \cdot \omega_2 + \frac{1}{k} \cdot \int \omega_k dt \right) \quad (5)$$

Az effort és a flow változók viszonya az ezt követő GY elem kapcsán a következő:

$$U_m = k_m \cdot \omega_1 \quad (6)$$

$$\tau_m = k_m \cdot i \quad (7)$$

Az $m_1 = N_1/N_2$ áttételű TF elem alapján az alábbi egyenletek adódnak:

$$\tau_{N_1} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \tau_{N_2} \quad (8)$$

$$\omega_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot \omega_1 \quad (9)$$

Ezek alapján k torziós tengely és a b_3 csapágyszáz viszonya az alábbi:

$$\tau_{N_2} = \tau_{b_2} + \tau_k \quad (10)$$

$$\frac{N_2}{N_1} \cdot \tau_{N_1} = b_2 \cdot \omega_2 + \frac{1}{k} \cdot \int \omega_k dt \quad (11)$$

$$\omega_k = \omega_2 - \omega_3 \quad (12)$$

$$k \cdot \frac{d\tau_k}{dt} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \omega_1 - \frac{\tau_{b_2}}{b_3} \quad (13)$$

$$\tau_{N_2} = \tau_k + \tau_{b_2} \quad (14)$$

$$\frac{N_2}{N_4} \cdot \tau_4 = \frac{1}{k} \cdot \int \omega_k dt - b_3 \cdot \omega_3 \quad (15)$$

Az N_3/N_4 áttételű TF differenciál-fogaskerékpár működését a következő összefüggések adják meg:

$$\tau_{N_4} = \frac{N_4}{N_2} \cdot \tau_{N_2} \quad (16)$$

$$\omega_3 = \frac{N_4}{N_2} \cdot \omega_4 \quad (17)$$

Végezetül pedig a J tehetetlenségi nyomaték és a b_4 csapágyszáz viszonya az alábbi:

$$\tau_J = \tau_{N_4} - \tau_{b_4} \quad (18)$$

$$J \cdot \frac{d\omega_4}{dt} = \frac{N_4}{N_2} \cdot \tau_3 - b_4 \cdot \omega_4 \quad (19)$$

4.4. Sebességszabályozás megvalósítása PID-alapon

A hajtáslánc fordulatszámviszonyainak modellezésére egy fordulatszám szabályozó loop került megtervezésre, PID-szabályozó alkalmazásával. A PID-szabályozók párhuzamos kompenzációján alapuló szabályozók, melyeket széles körben használnak lineáris rendszerekben. A szabályozó 3 komponenssel rendelkezik, amelyek az arányos (P), integráló (I) és származékos (D) tagok.

Működése hibajelen alapszik, ami a referenciajel és a szenzor által észlelt valós kimenet közötti előjeles eltérés. Az arányos rész (P) a hibajellel arányos végrehajtó jelet, az integráló tag (I) a hibajel integrálásával arányos, a derivált rész (D) pedig a hibajel deriváltjával arányos jelet hoz létre, melyek hatása összegzésre kerül. A PID szabályozók hiszterézisvezérlést használnak [12].

A PID-szabályozó működését 2 formában leíró egyenletek az alábbiak:

$$e(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

$$e(t) = K_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (21)$$

5. A szimulációs eredmények

A szimulációs modell elkészítése után a kezdeti értékek definiálása a következő lépés. Ezek az értékek határozzák meg a hajtáslánc viselkedését, valamint a PID-szabályozó hangolásához is szükségesek.

A szimuláció alatt beállított értékek az **1. táblázat**ban láthatók:

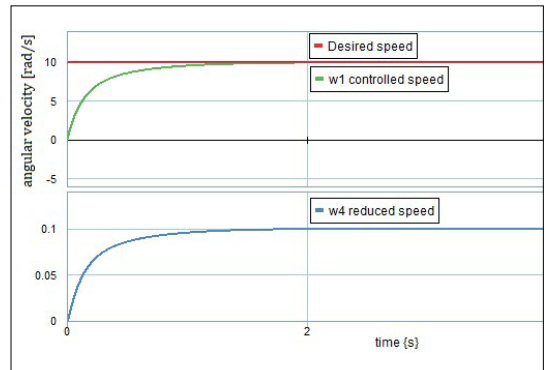
1. táblázat. A szimuláció kezdeti értékei

$R_a = 0,45 \Omega$	$k = 0,09 \text{ Nm/rad}$
$L_a = 0,1 \text{ mH}$	$J = 0,0011 \text{ kgm}^2$
$k_m = 0,067 \text{ Nm/A, Vs/rad}$	$N_1/N_2 = 0,1$
$b_1 = b_3 = b_4 = 0,1 \text{ Nms}$	$N_4/N_3 = 10$
$b_2 = 0,028 \text{ Nms}$	

A szabályozó nélküli hajtáslánc nyílt hurkú és instabil viselkedést eredményez. A PID-szabályozót a Ziegler-Nichols hangolási módszerrel hangoltuk, amely zárt hurokkal rendelkező, szimulált rendszereknél jól alkalmazható megoldás.

A hangolás első lépése a kritikus erősítési tényező és a periódusidő meghatározása az arányos (P) tag segítségével. Az integrálási idő (T_i) végtelen, míg a deriválási idő (T_d) zérus ebben az esetben. A kritikus erősítésnél állandó amplitúdójú rezonancia lép fel, mivel ez a rendszer stabilitásának határa. A K_p , T_i és T_d szabályozóértékek a Ziegler-Nichols-módszer saját összefüggései alapján határozhatók meg [12].

A 20-sim szimulációs szoftverben megjelenített szögsebesség értékek a **3. ábrán** láthatók:



3. ábra. A megjelenített szögsebesség értékek

Az első érték a kívánt referencia-szögsebesség (ω_{ref}), amelyet egy egységugrásfüggvény reprezentál. Ez az egyenáramú motor elvárt szögsebességértéke. A PID-szabályozó viselkedésének visszajelzése céljából a motor tengelyének közvetlen kimeneti szögsebessége is megjelentésre került (ω_1). A harmadik megjelenített érték a J tehetetlenségi nyomaték szögsebessége volt (ω_4). A hajtáslánc az ω_1 értéket a meghatározott áttételnek (1/100) megfelelően módosítja. Így a J tehetetlenségi nyomaték saját szögsebessége századrésze az előzőnek. Rövid tranziens állapot után a PMDC-motor kimenetén a szükséges 10 m/s értéknek kell megjelennie a PID-szabályozó hatására. A J tehetetlenségi nyomaték szögsebességének értéke pedig 0,1 rad/s.

6. Következtetések

A tanulmány során egy Multi-Domain-rendszer dinamikus rendszermodellje készült el. A rendszer elektromos és forgó mechanikus tartományokat egyaránt tartalmaz. Fontos kritérium a szimuláció dinamikussága és erőforrásigénye. Ennek megfelelően a Bond-gráf-alapú modellezés optimális megoldásnak bizonyult. A leíró nyelvezet szabályrendszere alapján a rendszeregyenletek közvetlenül a grafikus jelölésrendszerből kerültek meghatározásra. Ezen egyenletek további numerikus szimulációt tesznek lehetővé. Erre a célra szintén optimális környezet a 20-sim szimulációs szoftver, amely alacsony erőforrás-igényű, számos rendszermodellezés-módszert támogat.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] G. Husi, A. H. Abdulkareem: *Mechatronics Systems in the Cyber-physical Space*. Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, 2018.
- [2] R. H. Bishop: *The Mechatronics Handbook*. CRC Press LLC, Florida, U.S., 2002.

- [3] *Bond Graph Modelling*. 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms, iNaCoMM 2013, IIT Roorke, December 18-20, 2013.
- [4] J. A. Kypuros: *System Dynamics and Control with Bond Graph Modeling*. CRC Press Taylor & Francis Group LLC, U.S., 2013.
- [5] S. Das: *Mechatronic Modeling and Simulation Using Bond Graphs*. CRC Press Taylor & Francis Group LLC, Boca Raton, 2009.
- [6] W. Borutzky: *Bond Graphs for Modelling, Control and Fault Diagnosis of Engineering Systems*. Second edition, Springer International Publishing, Switzerland, 2017.
- [7] D. C. Karnopp: *System Dynamics – Modeling, Simulation, and Control of Mechatronics System*. Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2012.
- [8] R. C. Dorf, R. H. Bishop: *Modern Control Systems*. Thirteenth Edition, Pearson Education Inc., Hoboken, New Jersey, 2017.
- [9] J. Pintér: *Ipari robotok hajtása*. Robottechnika, 4. előadás, [Online]. <https://docplayer.hu/11254587-Ipari-robotok-hajtasa.html>. [Accessed: 20.01.2022.].
- [10] A. K. Gupta, S. K. Arora, J. R. Westcott: *Industrial Automation and Robotics: An Introduction*. Mercury Learning & Information Publishing, 2016.
- [11] Z. Luo: *Robotics, Automation, and Control in Industrial and Service Settings*. Engineering Science Reference, United States of America, 2015.
- [12] S. Duman, U. Guvenc: *Determination of the PID Controller Parameters for Speed and Position Control of DC Motor Using Gravitational Search Algorithm*, January 2011. https://www.researchgate.net/publication/254048079_Determination_of_the_PID_controller_parameters_for_speed_and_position_control_of_DC_motor_using_Gravitational_Search_Algorithm. [Accessed: 20.01.2022.].